

## Aplikasi statistika dalam menentukan nilai karakteristik tanah: sebuah studi pustaka

BUDHI SETIAWAN

Laboratorium Mekanika Tanah, Jurusan Teknik Sipil Universitas Sriwijaya  
Jl. Raya Palembang Prabumulih Km. 32 Palembang, Indonesia  
Postdoctoral Fellow, Civil Engineering Department, Gifu University-Japan  
Yanagido 1-1, Gifu-shi Gifu 501-1193 Japan

### SARI

Makalah ini membahas metode penentuan nilai karakteristik tanah dengan menggunakan pendekatan statistika. Nilai yang didapat dalam rancangan kondisi batas (*limit state design*) bukanlah nilai karakteristik tanah hasil pengukuran, baik di lapangan maupun di laboratorium. Dua konsep yang membingungkan dalam statistik mekanika tanah akan didiskusikan di sini. Kedua konsep tersebut adalah: pemodelan variabilitas (*variability*) menggunakan pendekatan *random field* dan perbedaan antara nilai *mean* populasi dan *mean* percontoh. Dua konsep ini secara intrinsik berdekatan. Oleh karena itu, dalam makalah ini ditunjukkan bahwa hal yang membingungkan atau dilematis dalam menentukan nilai karakteristik tanah dapat dihilangkan dengan menggunakan pendekatan secara statistika.

**Kata kunci:** parameter sifat tanah, metode statistik, nilai karakteristik

### ABSTRACT

*In this paper, determination of characteristic value of soil properties based on a statistical method is explained. The value in the limit state design is not the point value as measured by a laboratory or field test. Two confusing concepts in statistical soil mechanics are: the modeling of variability by a random field model and the distinction between the population mean and sample mean. Intrinsically, these two concepts are related to each others. The paper demonstrates that the most confusing thing what is being dilemmas in determining soil characteristic value may be removed by considering a statistical method.*

**Keywords:** soil properties parameter, statistic method, characteristic value

### PENDAHULUAN

Dalam pendekatan geoteknik secara tradisional, tidak ada cara menentukan nilai karakteristik tanah secara khusus (Honjo dan Setiawan, 2007). Beberapa ahli cenderung menggunakan nilai konservatif, suatu nilai yang biasa dipakai, yaitu nilai rata-rata. Berbeda dengan konsep tradisional, dalam konsep modern seperti *Eurocode 7* (Orr dan Farrel, 1999) yang merupakan salah satu *draft* kode moderen (*modern code drafting*), hal tersebut merupakan masalah yang mendapat perhatian cukup serius dari para ahli yang terlibat di dalamnya. Nilai karakteristik tanah adalah suatu nilai yang menggambarkan

parameter geoteknik (misalnya nilai kuat geser tanah) dalam satu lapisan geologi yang homogen, dan penentuan nilai tersebut merupakan sesuatu yang mendapat perhatian mendalam seperti halnya dalam *Eurocode 7* (Ovesen, 1989; Orr dan Farrel, 1999) serta lainnya (Honjo dan Kusakabe, 2002).

Di sisi lain, variasi spasial atau perbedaan ruang kedudukan dalam sifat tanah dapat dimodelkan dengan menggunakan pendekatan *random field* (RF) seperti diusulkan oleh Lumb (1974), Vanmarcke (1977), serta lainnya. Dalam RF, variasi struktur korelasi spasial parameter geoteknik dianggap memiliki peranan penting. Oleh karena itu, parameter yang akan digunakan dalam makalah ini adalah

mean ( $\mu$ ), variansi ( $\sigma^2$ ), dan struktur korelasi (misalnya *autocorrelation distance*,  $\rho$ ).

Dalam makalah ini dijelaskan penentuan nilai karakteristik tanah berdasarkan pendekatan nilai rata-rata percontoh (*sample mean*) serta melalui pendekatan model variabilitas tanah (*variability of soil*) yang didasarkan pada metode statistik.

### NILAI KARAKTERISTIK

Dalam *Eurocode 7*, nilai karakteristik parameter geoteknik dijelaskan sebagai berikut:

- a. Pemilihan nilai karakter parameter geoteknik harus didasarkan pada nilai yang diperoleh dari tes laboratorium dan tes lapangan, yang dilengkapi dengan pengalaman peneliti yang cukup baik.
- b. Nilai karakteristik parameter geoteknik harus dipilih sebagai nilai *cautious estimate* yang memberikan pengaruh ke dalam *limit state*.
- c. Pemilihan nilai karakteristik parameter geoteknik harus mempertimbangkan hal sebagai berikut:
  - kondisi geologi serta informasi lainnya, seperti data dari penelitian sebelumnya,
  - keragaman nilai hasil pengukuran langsung yang diperoleh serta informasi lain yang berhubungan seperti data penelitian sebelumnya,
  - memperbanyak penyelidikan lapangan dan laboratorium,
  - tipe dan jumlah percontoh,
  - melakukan penelitian lebih intensif di dalam daerah penyelidikan berdasarkan pada perilaku struktur geoteknik dan *limit state* yang diperlukan, serta
  - kemampuan struktur geoteknik untuk memindahkan beban dari zona yang lemah ke zona kuat.
- d. Jika metode statistika digunakan dalam memilih nilai karakteristik tanah untuk suatu penentuan sifat permukaan, beberapa metode yang berbeda dapat digunakan untuk teknik pengambilan percontoh lokal dan regional serta menggunakan pengetahuan awal untuk perbandingan sifat permukaan (*ground surface*).
- e. Jika metode statistik digunakan, nilai karakteristik disarankan sebagai nilai yang diperoleh

leh dari hitungan probabilitas kejadian dalam *limit state design*, yang nilainya tidak lebih dari 5%.

Cardoso dan Fernandes (2001) mencoba menentukan nilai karakteristik parameter permukaan dan *probability failure* dalam desain dengan mengacu kepada *Eurocode 7*. Metode ini dipakai untuk analisis *bearing capacity* tanggul pada tanah *soft clay* dan *spread footing* pada jenis tanah kohesif dan nonkohesif. Mereka menemukan bahwa didasarkan pada *parametric study*, dimungkinkan untuk melakukan evaluasi terhadap *reduction factor* yang nilai *mean of strength parameter*-nya harus dikalikan dengan suatu koefisien untuk menentukan nilai karakteristik yang diinginkan mendekati target *probability of failure* yang diharapkan.

### VARIABILITAS TANAH (SOIL VARIABILITY)

Parameter geoteknik dalam satu lapisan tanah diberi notasi  $X(z)$ , dengan  $z$  adalah koordinat dalam arah vertikal (dalam makalah ini hanya akan dibahas kasus dalam 1-dimensi). Dengan menggunakan asumsi kondisi diam (statis) tingkat kedua (*second-order stationary*), misalnya keadaan diam dalam pengertian satu kondisi yang lemah (*stationarity in a weak sense*) maka persamaan yang memenuhi adalah seperti di bawah ini:

$$E[X(z)] = \mu \quad (1)$$

$$\text{Var}[X(z)] = E[X(z) - \mu]^2 = \sigma^2 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}[X(z), X(z+\Delta z)] &= E[(X(z) - \mu)(X(z + \Delta z) - \mu)] \\ &= \sigma^2 \rho(\Delta z) \end{aligned} \quad (3)$$

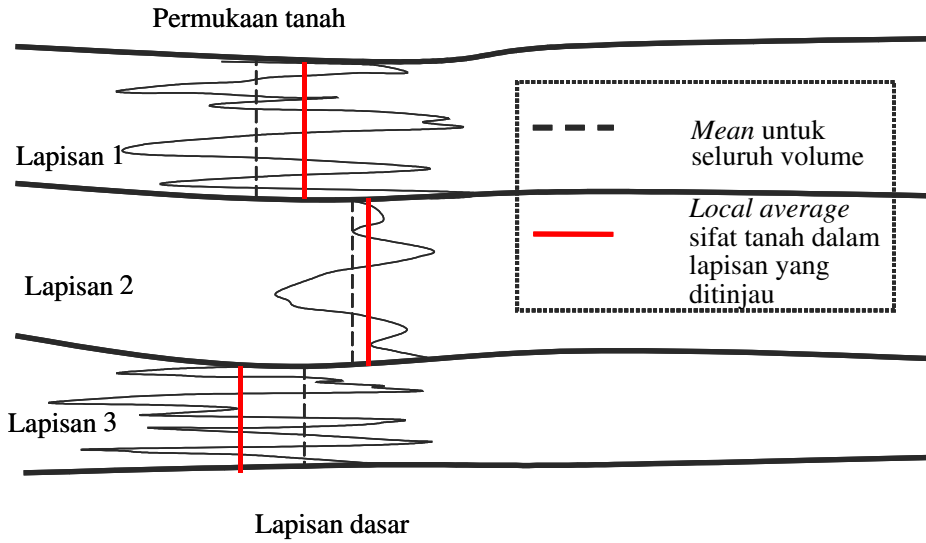
$\mu$  adalah rata-rata (*mean*),  $\sigma^2$  adalah varian, dan  $\rho$  adalah fungsi korelasi diri (*autocorrelation function*), serta Cov adalah kovarian.

Salah satu *autocorrelation function* adalah *exponential type autocorrelation function* (EAF):

$$\rho(\Delta z) = \exp\left[-\frac{(\Delta z)}{\theta}\right] \quad (4)$$

dengan  $\theta$  adalah jarak korelasi diri (*autocorrelation distance*).

Hal ini menunjukkan bahwa *mean* dari rata-rata setempat (*Local Average, LA*), misalnya lokasi atau



Gambar 1. Perbedaan antara *mean* dan *local average* (Setiawan, 2007).

kedalaman yang diamati, dapat mendekati atau bahkan hampir sama dengan nilai *mean* dari *RF*,  $\mu$  (seperti pada Gambar 1). Selanjutnya, Vanmarcke (1977) mempelajari secara intensif mengenai reduksi varian (*variance reduction*) dari varian asli dalam *random fields*, dan hasil penurunannya disebut dengan fungsi varian (*variance function*), yang dirumuskan sebagai berikut:

$$s_L^2 = E \left[ \left\{ \frac{1}{L} \int_0^L X(z) dz - \mu \right\}^2 \right] = \sigma^2 \Gamma^2(L) \quad (5)$$

dengan *variance function* dalam *EAF* adalah sebagai berikut:

$$\Gamma^2(L) = \left( \frac{\theta}{L} \right)^2 2 \left( \frac{L}{\theta} - 1 + \exp \left( -\frac{L}{\theta} \right) \right) \quad (6)$$

Nilai *LA* ini dapat berbeda secara nyata dengan nilai *mean* dari *RF*, sebab tebal lapisan atau jarak pengamatan (*L*) tidak mampu untuk menampung semua kemungkinan fluktuasi *RF* ini. Berhubung *LA* ini sangat dipengaruhi oleh besarnya tebal lapisan (*L*) dan nilai *autocorrelation function* ( $\theta$ ), maka diperlukan ketebalan lapisan yang dibuat normal (*normalized layer thickness*), yang dirumuskan sebagai berikut:

$$L_n = \frac{L}{\theta} \quad (7)$$

Untuk kondisi regional (seperti butir d dalam

*Eurocode 7* tersebut di atas), dengan mengacu kepada pendekatan yang dilakukan oleh Vanmarcke (1977) serta persamaan (7) di atas, maka varian perkiraan (*estimation variance*) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$x_k = \bar{x} - z_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \bar{x} \left( 1 - z_\alpha \frac{COV}{\sqrt{n}} \right) \quad (8)$$

Penurunan persamaan secara lengkap dapat ditemukan dalam Honjo dan Setiawan (2007) dan *variance function*-nya dapat dituliskan sebagai berikut:

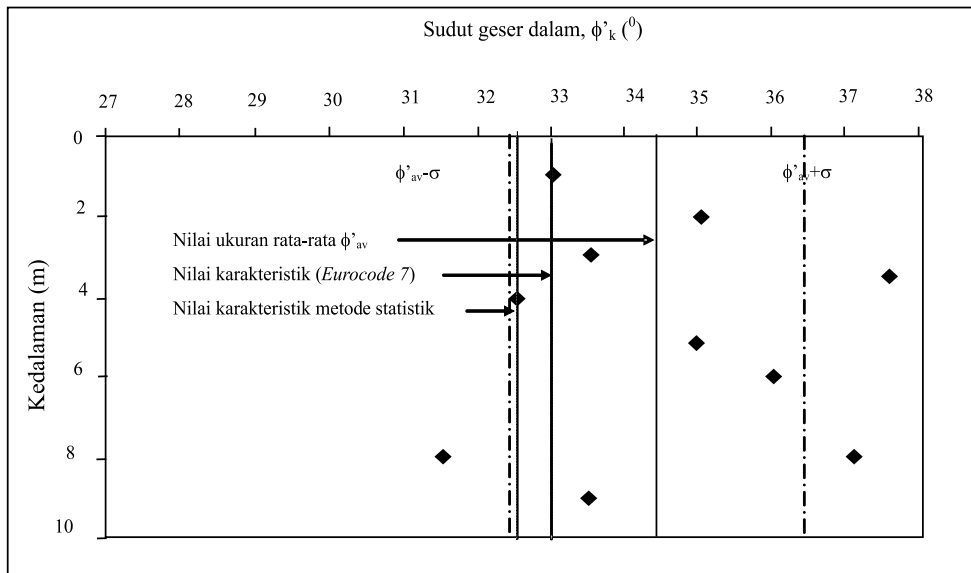
$$\Lambda_G^2(n, L_n) = \frac{s_{LG}^2}{\sigma^2} = \frac{1}{n} \left\{ n + \sum_{i=1}^{n-1} 2(n-1) \rho(\Delta z) \right\} \quad (9)$$

## DISKUSI

Metode yang umum dipakai dalam menentukan nilai karakteristik dalam *Eurocode 7* didasarkan pada teori statistika tradisional, yaitu dengan menggunakan *confidence interval* (Orr dan Farrel, 1999). Nilai karakteristik untuk batas bawah dirumuskan sebagai berikut:

$$x_k = \bar{x} - z_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \bar{x} \left( 1 - z_\alpha \frac{COV}{\sqrt{n}} \right) \quad (10)$$

di sini: *COV* adalah *coefficient of variation* yaitu



Gambar 2. Sebaran nilai  $\phi'$  untuk lapisan tanah homogen dan nilai karakteristik (modifikasi dari Orr dan Farrel, 1999).

mean dibagi dengan simpangan baku.

Dengan menggunakan prinsip yang sama untuk menentukan nilai karakteristik tanah berdasarkan metode statistika (*variance reduction function*), yaitu menggantikan  $1/\sqrt{n}$  pada persamaan (10) dengan  $\Lambda_G^z(n, L_n)$  maka diperoleh persamaan berikut.

$$x_k = \bar{x} - z_\alpha \times s_{LG}(n, L_n) = \bar{x} (1 - z_\alpha \times \Lambda_G(n, L_n) \times COV) \quad (11)$$

Untuk memudahkan pemahaman, di bawah diberikan contoh dengan data yang ditampilkan berasal dari Orr dan Farrel (1999) untuk menentukan nilai karakteristik dalam kaitannya dengan *Eurocode 7*, seperti dalam Gambar 2.

Rata-rata aritmetika percontoh tersebut adalah  $34,4^\circ$  dan simpangan baku  $1,97^\circ$  (atau nilai  $COV = 0,057$ ). Dalam Gambar 2 juga diperlihatkan nilai simpangan minimal ( $\phi_{av} - \sigma$ ) dan maksimal ( $\phi_{av} + \sigma$ ) dalam pendekatan *limit state design*. Dengan menggunakan persamaan (10) dan interval kepercayaan (*confidence interval*) 95% ( $z_\alpha = 2,26$ ), maka nilai karakteristik berdasarkan *Eurocode 7* adalah  $33^\circ$ .

Pendekatan selanjutnya adalah pendekatan dengan menggunakan metode statistika (*variance reduction function*) yang berdasarkan pada pendekatan *RF*, yaitu persamaan (11). Persamaan tersebut memerlukan nilai  $COV$  dan *autocorrelation distance*. Phoon

dan Kulhawy (1999) mengumpulkan sejumlah hasil tes beberapa parameter tanah. Berdasarkan pada rekomendasinya,  $COV$  untuk jenis tanah pasir antara 5% sampai 11 % dengan nilai rata-rata 9%. Hasil ini konsisten dengan data yang ada dalam contoh di atas. Meskipun demikian, dalam kasus ini adalah tidak cukup untuk memilih nilai  $COV$  sebesar 8%.

Nilai lain yang dibutuhkan yaitu *autocorrelation distance* (atau *scale of fluctuation*) dalam makalah ini diasumsikan berdasarkan tipe *EAF*. Di dalam tabel Phoon dan Kulhawy (1999) tersebut belum ada data nilai *autocorrelation distance* untuk nilai *friction of angle* jenis tanah pasir. Meskipun demikian, nilai *scale of fluctuation* untuk data *cone penetration resistance*,  $q_c$  untuk jenis tanah pasir ada dalam tabel untuk berbagai kasus dan direkomendasikan antara 0,1 sampai dengan 2,1 m.

Berdasarkan pendekatan yang diturunkan oleh Honjo dan Setiawan (2007), maka penentuan nilai karakteristik dengan menggunakan persamaan (11) dengan data berikut ini:  $\phi = 34,4^\circ$ ,  $COV = 0,08$ ,  $z_{0.05} = 1,645$ ,  $\Lambda_G = 0,411$  diperoleh nilai karakteristik untuk batas bawah  $32,5^\circ$  yang diperlihatkan dalam Gambar 2 (Catatan: nilai  $\Lambda_G$  untuk nilai lainnya dapat dilihat dalam Setiawan, 2007).

Dalam Gambar 2 di atas dapat dilihat bahwa nilai karakteristik, baik dengan menggunakan pendekatan

*Eurocode 7* maupun metode statistik, berada dalam simpangan batas atas dan batas bawah rata-rata setempat yang ditinjau. Simpangan batas atas dan batas bawah rata-rata setempat merupakan nilai yang biasa digunakan oleh para ahli geoteknik dalam menentukan nilai desain. Dengan menggunakan metode statistik ini, maka ahli geoteknik dalam suatu desain bangunan misalnya dapat menghitung batas minimum suatu parameter sifat tanah dengan lebih yakin, dibandingkan dengan cara menaksir nilai minimum tersebut dari simpangan batas bawah.

### KESIMPULAN

Nilai karakteristik yang ditentukan berdasarkan *Eurocode 7* dan metode statistik (pendekatan *variance reduction function*) menunjukkan hasil yang dapat dipertanggungjawabkan. Penentuan *variance reduction function* ini dilaksanakan dengan menggunakan pendekatan *random field* dan *correlation function*. Meskipun demikian, penentuan *variance reduction* ini masih memerlukan penelitian lebih lanjut, sebab asumsi yang digunakan bersifat sederhana, yaitu besar *variance* dan *correlation structure*-nya dianggap telah diketahui.

**Ucapan Terima Kasih**--Terima kasih penulis ucapkan kepada Ir. Oman Abdurahman, atas koreksi awal dan sarannya terhadap makalah ini. Penulis tidak lupa mengucapkan terima kasih kepada rekan sejawat lainnya atas saran dan masukannya, sehingga makalah ini dapat menjadi lebih baik bobotnya.

### ACUAN

- Cardoso, A.S. dan Fernandes, M.M., 2001. Characteristic value of ground parameters and probability of failure in design according to *Eurocode 7. Geotechnique* 51 (6), h.519-531.
- Honjo, Y. dan Kusakabe, O., 2002. Proposal of a comprehensive foundation code: Geo-code 21 ver.2. Dalam: Honjo, Y., Kusakabe, O., Matsui, K., Kouda, M., dan Pokharel, G. (Eds.), *Foundation Design Code and Soil Investigation in view of International Harmonization and Performance Based Design*, h. 95-103, Swets and Zeitlinger B.V.: The Netherlands.
- Honjo, Y., dan Setiawan, B., 2007. General and local estimation of local average and their application in geotechnical parameter estimation. *Georisk*, 1 (3), h. 167-176.
- Lumb, P., 1974. Application of statistic in Soil Mechanics. Dalam: Lee, IK (ed.) *Soil Mechanic – New Horizon*, h.44-110, Newness Butterworth, London.
- Orr, T.L.L. dan Farrel, E.R., 1999. *Geotechnical Design Code to Eurocode 7*. Springer-Verlag, London.
- Ovesen, N.K., 1989. General report session 30: Codes and Standard. *Proceedings of the XII ISCMFE* (3), Rio de Janeiro, h. 2751-2764.
- Phoon, K.K. dan Kulhawy, F.H., 1999. Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 30, h.612-624.
- Setiawan, B., 2007. *Sample size determination for determining characteristic values of soil parameters based on a statistical method*. PhD Thesis at Dept. of Civil Engineering, h. 43-47.
- Vanmarcke, E.H., 1977. Probabilistic modeling of soil properties. *Journal Geotechnical Engineering (ASCE)*, 103 (GT 11), h. 1227-1246